

Was ist Gravitation?

Über die Einheit fundamentaler Wechselwirkungen zur Natur schwarzer Löcher

Hans Peter Nilles

Physikalisches Institut, Universität Bonn



Schwerkraft=Gravitation

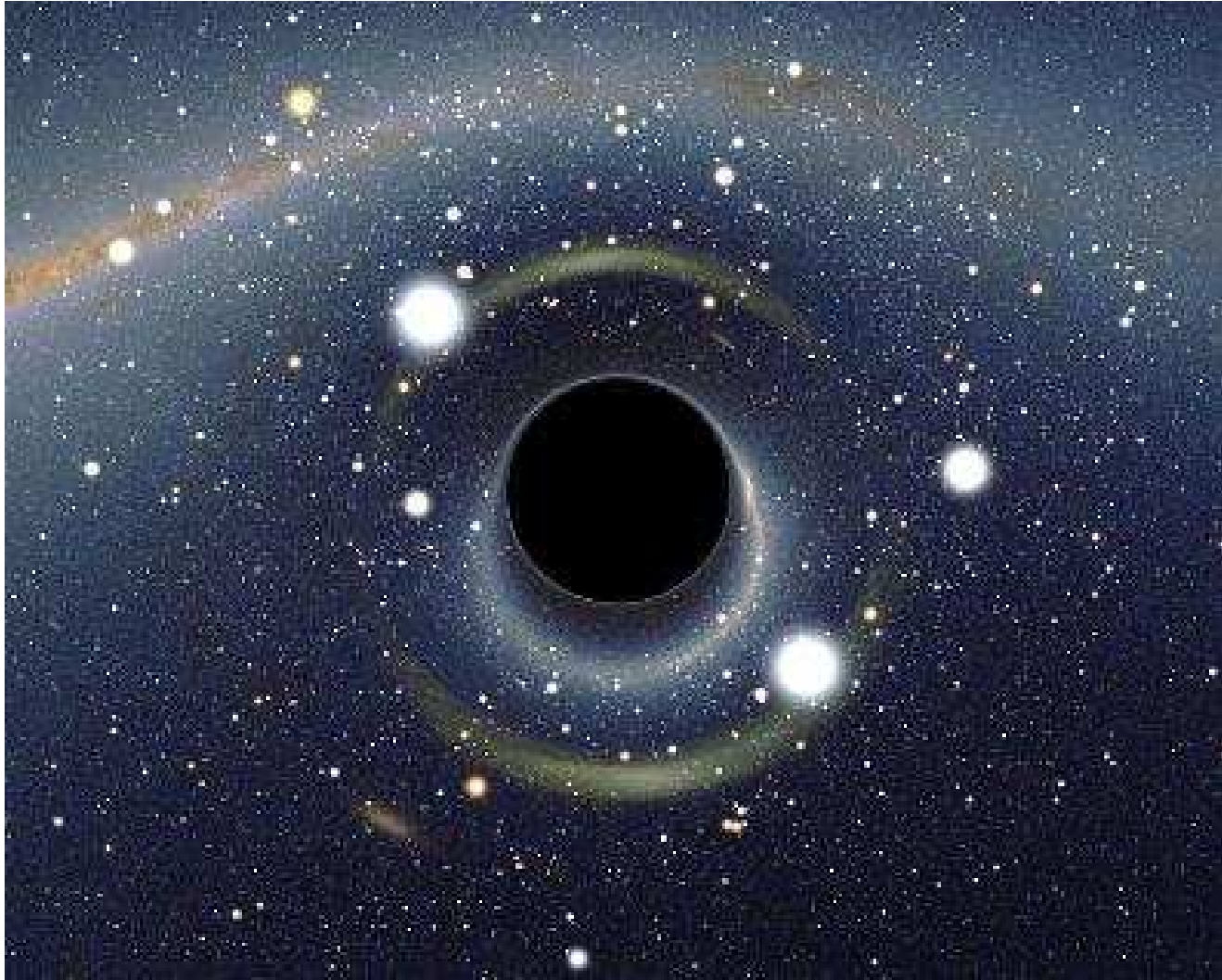
- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:
die am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte

Schwerkraft=Gravitation

- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:
die am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte

- Gravitation und Quantentheorie?
das “Jahrhundertproblem”
- das Rätsel der schwarzen Löcher

Schwarzes Loch



Schwerkraft=Gravitation

- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:
die am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte
- Gravitation und Quantentheorie?
das “Jahrhundertsproblem”
- das Rätsel der schwarzen Löcher
- Fortschritt auf Umwegen: müssen wohl zuerst die anderen Kräfte verstehen.

Was ist Kraft?

Klassifikation: welche Kräfte gibt es?

- Muskelkraft
- Wasserkraft, Sonnenkraft (Sonnenenergie)
- Himmelskraft
- Lebenskraft.....

Was ist Kraft?

Klassifikation: welche Kräfte gibt es?

- Muskelkraft
- Wasserkraft, Sonnenkraft (Sonnenenergie)
- Himmelskraft
- Lebenskraft.....

Wichtig ist eine präzise Definition:

- Was bewirkt eine Kraft?
- Gibt es “fundamentale” Kräfte?
- Was ist der Ursprung dieser Kräfte?

Gravitation

- Definition des Begriffes Kraft
- Grundlegende Erkenntnisse zur Schwerkraft (Gravitation)



(I. Newton, 1642-1726)

- Kraft = Masse x Beschleunigung
- Bewegung der Himmelskörper und Erdanziehung haben den gleichen Ursprung und werden durch die gleichen Gesetze beschrieben!

Fundamentale Kräfte

- genügen einfachen Gesetzen
- tragen zum Verständnis der Naturphänomene bei
- **vereinheitlichte Beschreibung der Kräfte**

Fundamentale Kräfte

- genügen einfachen Gesetzen
- tragen zum Verständnis der Naturphänomene bei
- vereinheitlichte Beschreibung der Kräfte

Gravitation:

- Gravitation erscheint (vorläufig) als fundamental
- gibt es andere fundamentale Kräfte?
- Elektrizität?
- Magnetismus?

Elektrizität und Magnetismus

- Maxwellsche Gleichungen
- Elektromagnetische Wechselwirkungen



J. C. Maxwell, 1831-1879

- Die Einheit von Elektrizität und Magnetismus
- Der Begriff des elektromagnetischen Feldes
- Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit!

Elektromagnetische Wellen

- Elektromagnetisches Feld hat physikalische Bedeutung
- und ist nicht nur ein mathematisches Konstrukt.



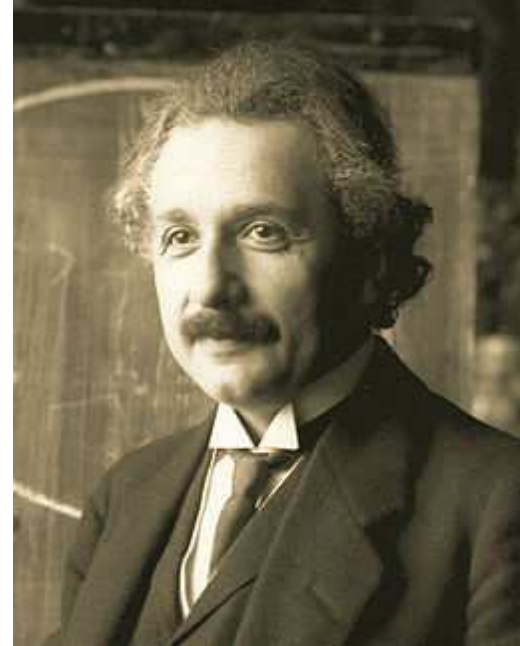
(H.Hertz, 1857-1894)

- Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen
- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit!

Die Substanz des Feldes

- Spezielle Relativitätstheorie

- Photo-Effekt:
Lichtquanten
(Photonen)



(A. Einstein, 1879-1955)

- Feld-Quanten als Substanz der Kraftfelder
- das Konzept des Austauschteilchens fundamentaler Wechselwirkungen

Allgemeine Relativitätstheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie ist die relativistische Erweiterung der Newtonschen Theorie der Gravitation

- beschrieben durch ein Gravitationsfeld
- endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der gravitationellen Wirkung
- Gravitation als geometrische Eigenschaft (Krümmung) der Raum-Zeit
- Existenz von Gravitationswellen?
- Graviton als Feldquant?

Gravitationswechselwirkungen sehr viel schwächer als elektromagnetische Wechselwirkungen.

Fundamentale Wechselwirkungen

Zu diesem Zeitpunkt kannte man zwei fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation und Elektromagnetismus

Fundamentale Wechselwirkungen

Zu diesem Zeitpunkt kannte man zwei fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation und Elektromagnetismus

Physik der Atome und Moleküle kann komplett durch elektromagnetische Wechselwirkungen erklärt werden

- Suche nach einheitlicher Theorie (Welt-Formel)
- Entdeckung zweier neuer (offenbar fundamentaler) Kräfte
- Schwache und starke Wechselwirkung im subatomaren Bereich

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**
Stärke 1, Reichweite 10^{-13} cm

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**
Stärke 1, Reichweite 10^{-13} cm
- **Elektromagnetismus:**
Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , Photon, Spin 1

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**
Stärke 1, Reichweite 10^{-13} cm
- **Elektromagnetismus:**
Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , Photon, Spin 1
- **Schwache Wechselwirkung:**
Stärke 10^{-5} , Reichweite 10^{-15} cm

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**
Stärke 1, Reichweite 10^{-13} cm
- **Elektromagnetismus:**
Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , Photon, Spin 1
- **Schwache Wechselwirkung:**
Stärke 10^{-5} , Reichweite 10^{-15} cm
- **Gravitation:**
Stärke 10^{-38} , Reichweite ∞ , Graviton, Spin 2

Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- **Quantenelektrodynamik (QED)** als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen

Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED

Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien

Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien
- Einheitliche Beschreibung von schwacher Wechselwirkung und Elektromagnetismus

Glashow-Salam-Weinberg



- Beschreibung der schwachen und elektromagnetischen WW im Rahmen der Eichtheorie $SU(2) \times U(1)$
- Vorhersage der Eichbosonen W^+ , W^- , Z (1967)
- Nachweis 1983 am CERN in Genf

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**

Stärke 1, Reichweite 10^{-13} cm, **Gluon, Spin 1**

- **Elektromagnetismus:**

Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , **Photon, Spin 1**

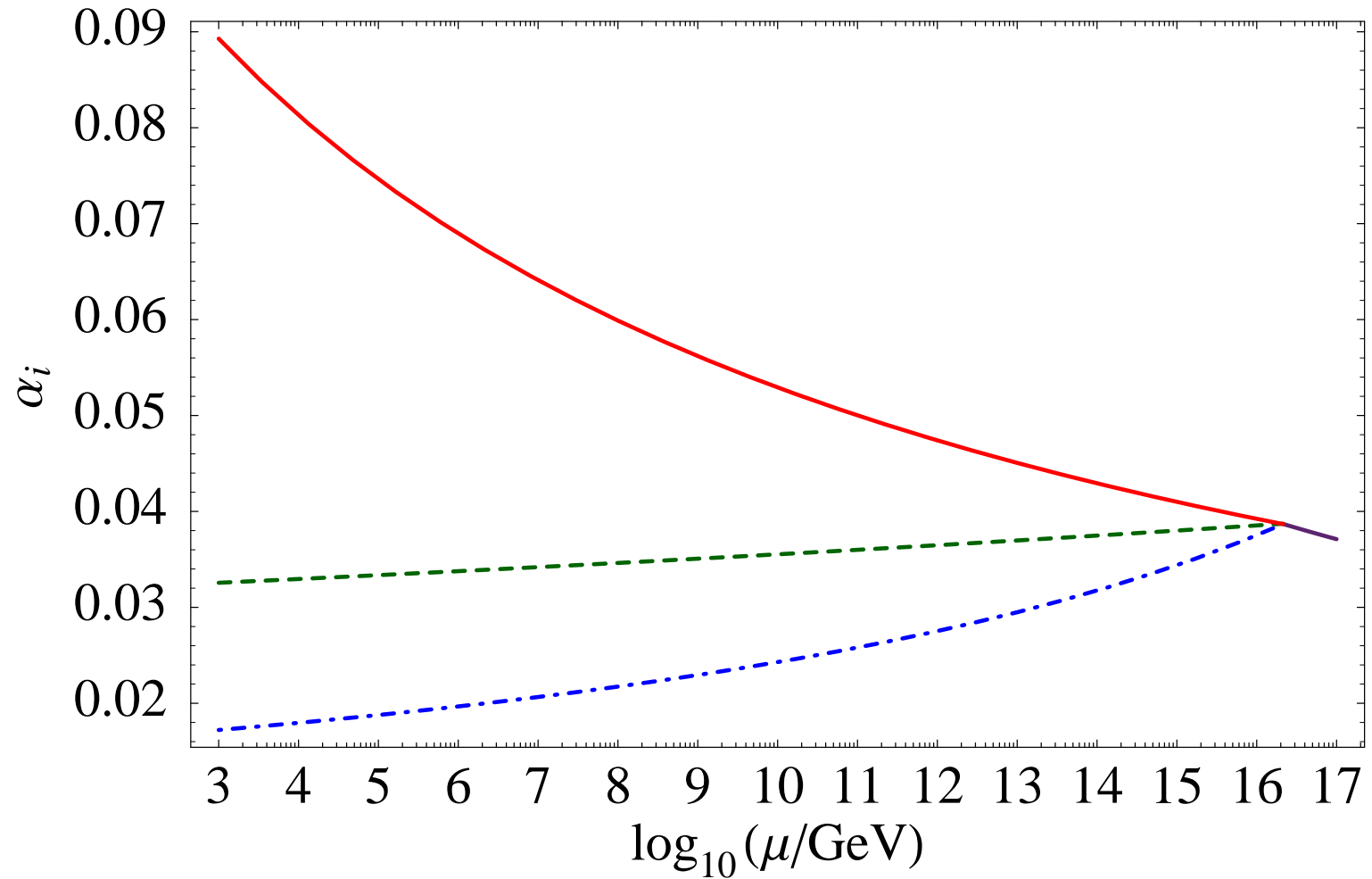
- **Schwache Wechselwirkung:**

Stärke 10^{-5} , Reichweite 10^{-15} cm, **W^+ , W^- , Z , Spin 1**

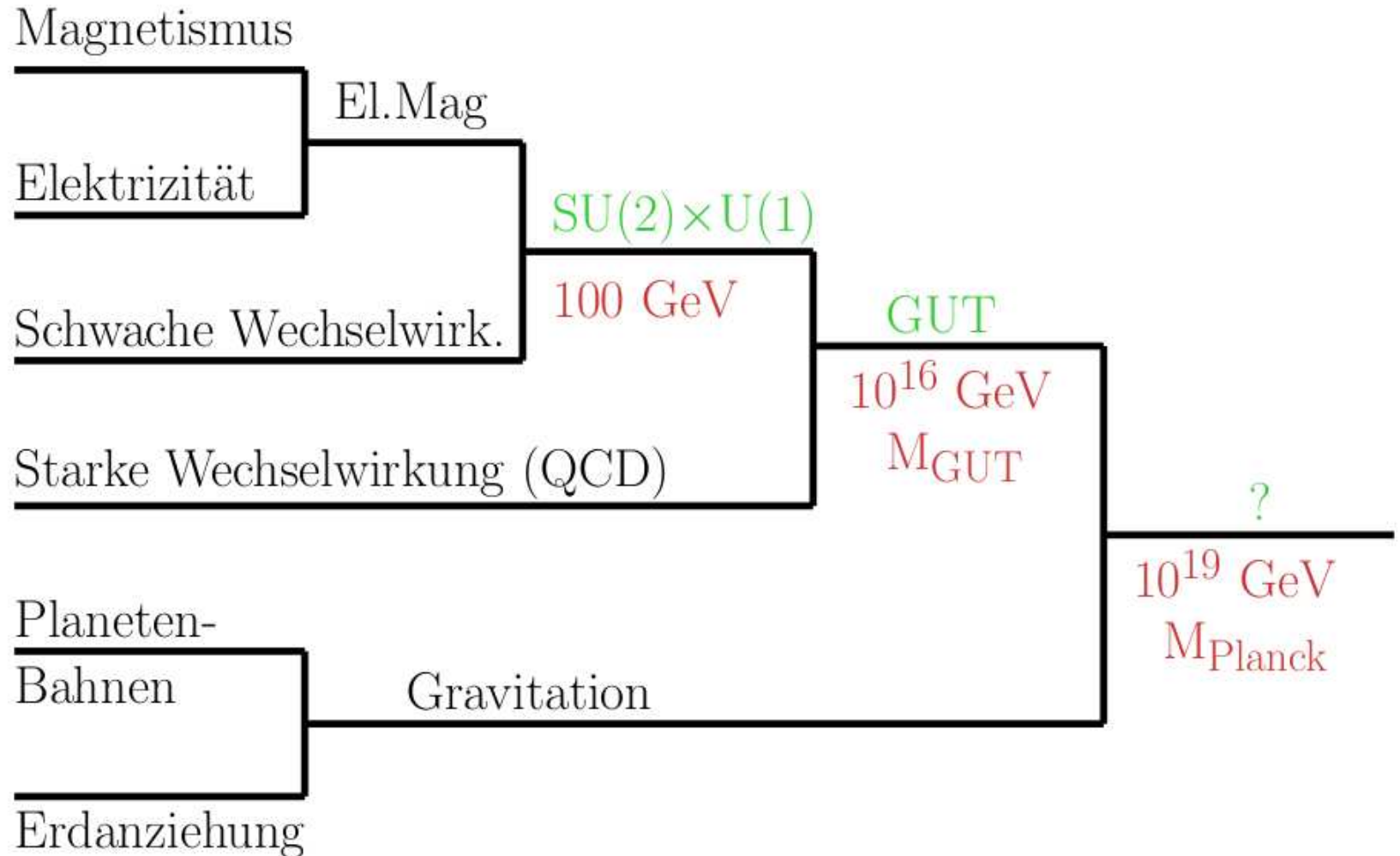
- **Gravitation:**

Stärke 10^{-38} , Reichweite ∞ , **Graviton, Spin 2**

Evolution der Eichkopplungen



Grand Unification



Gravitation heute

Klassisch beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins

- Gravitationsfeld mit endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit der gravitationellen Wirkung
- Gravitationswellen?
- Graviton als Feldquant (Spin 2)?
- Gravitation als “Geometrie” der Raum-Zeit
- schwächste der fundamentalen Kräfte

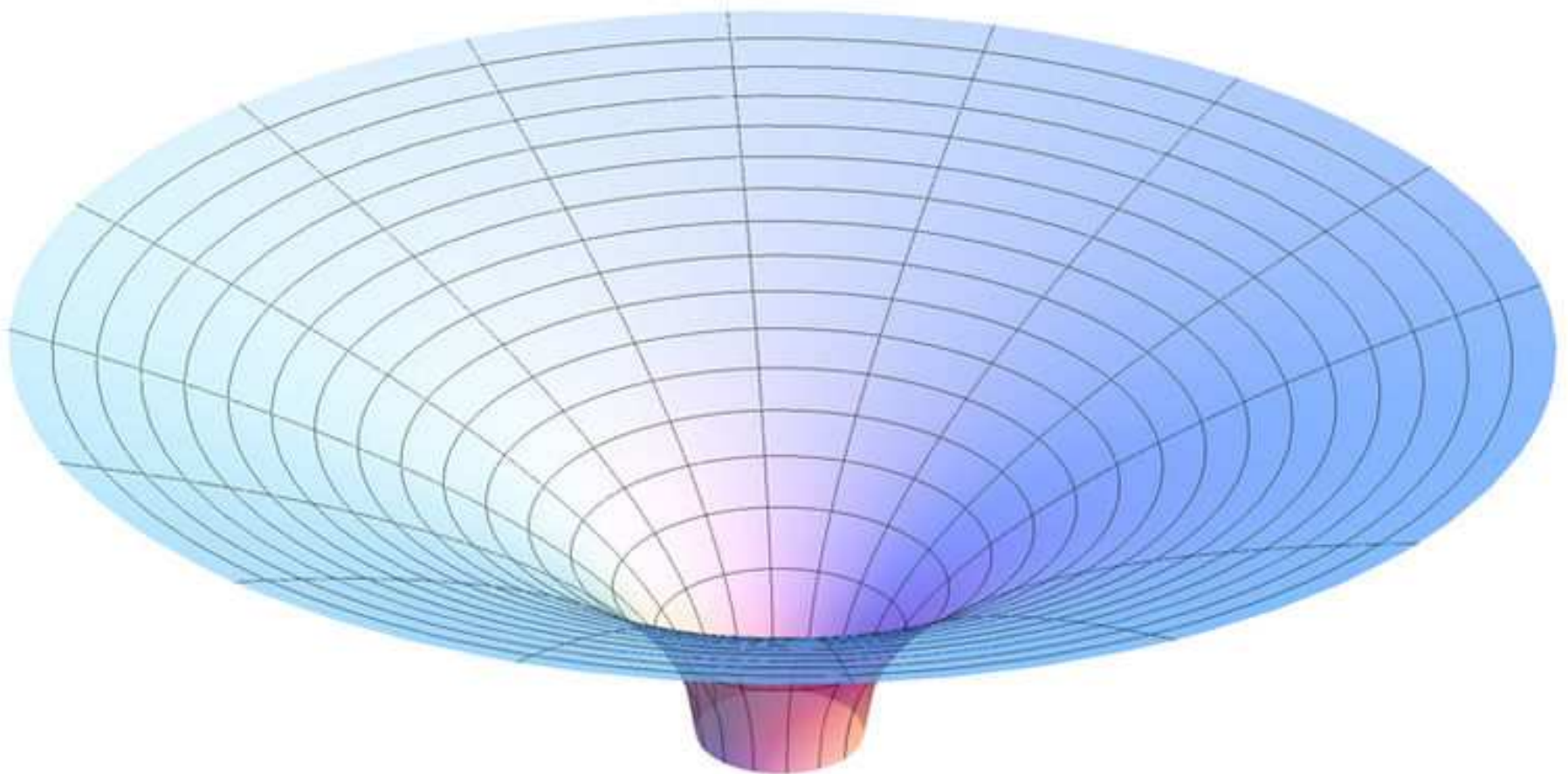
Konsistente Einbettung in die Quantentheorie noch nicht geglückt!

Probleme der Gravitation

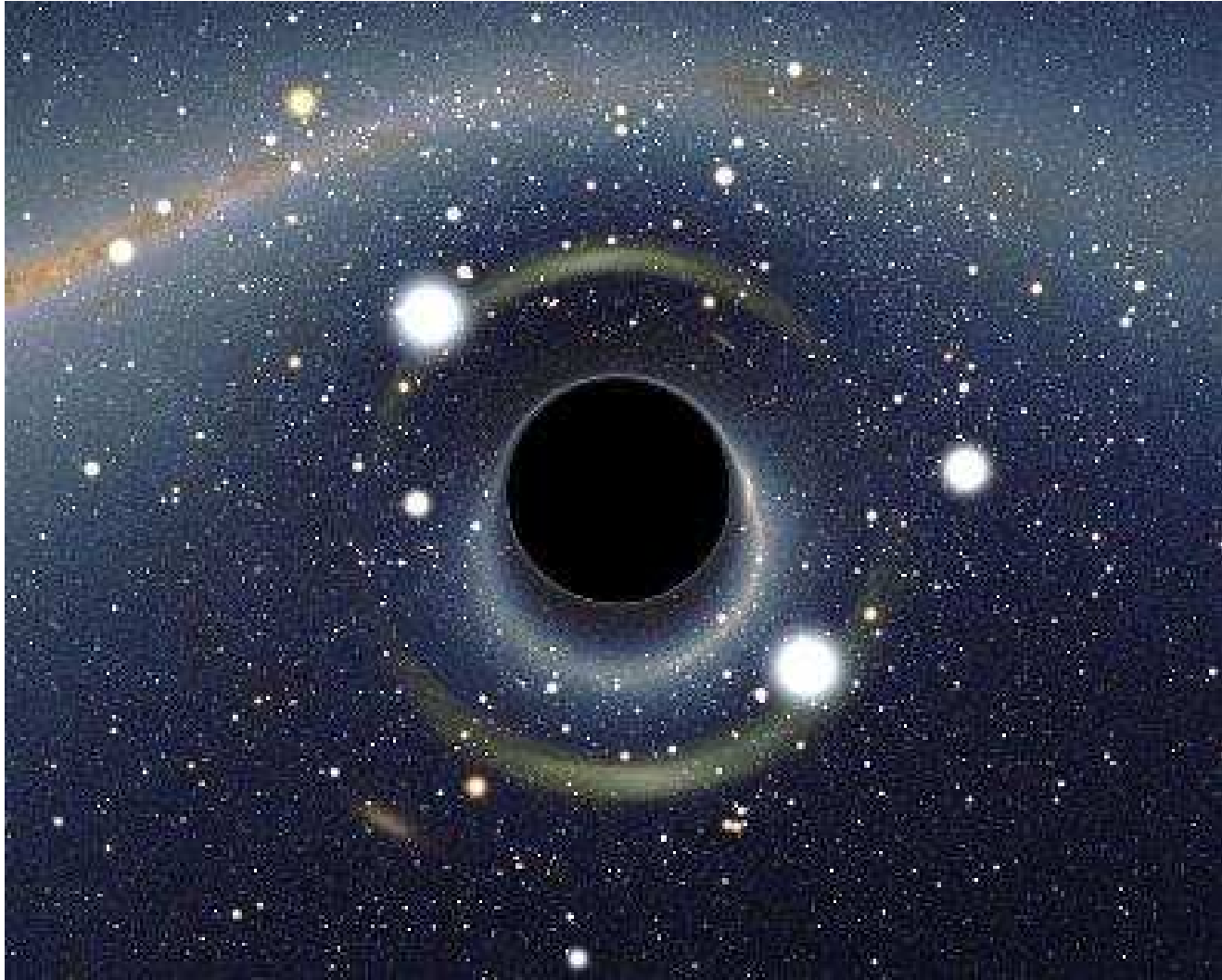
Probleme sind rein theoretischer Natur

- Singularitäten und Renormierbarkeit
- Graviton als Feldquant (Spin 2)?
- Schwarzschildlösung und **schwarze Löcher**

Schwarzschild-Metrik

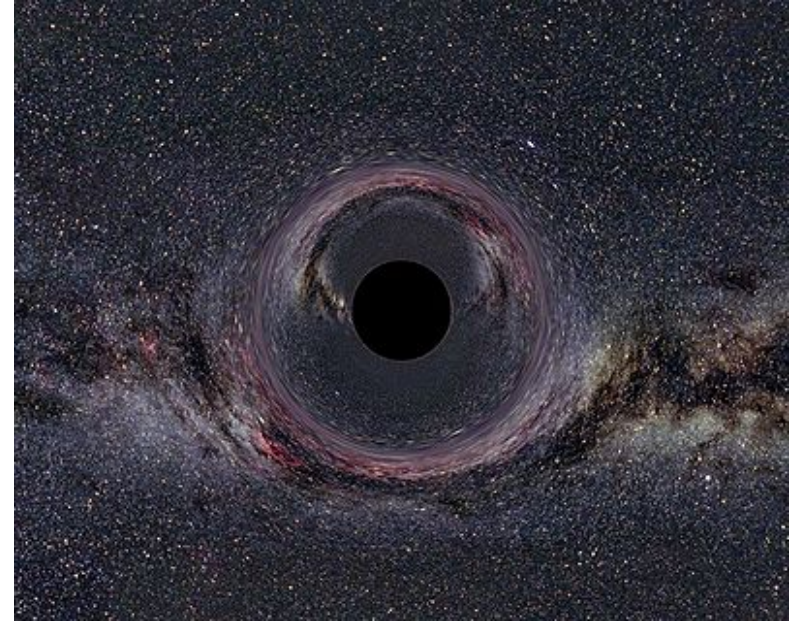


Schwarzes Loch



Die Rätsel schwarzer Löcher

- Hawking-Strahlung: das schwarze Loch ist gar nicht schwarz
- der Horizont des schwarzen Loches



- Oberfläche und Volumen: holographisches Prinzip
- Entropie wächst mit der Oberfläche
- der Horizont als physikalisches Objekt

Dualitäten

- Dualitäten der Stringtheorie verknüpfen verschiedene Theorien
- AdS/CFT relevant für die Gravitation
- eine Quantenfeldtheorie am Rand beschreibt Gravitation im Innern
- vielfältige Anwendungen (AdS/QCD, AdS/CondMat.....)
- erlaubt quantenmechanisch konsistente Beschreibung schwarzer Löcher



(J. Maldacena, 1968-)

Quanten-Gravitation

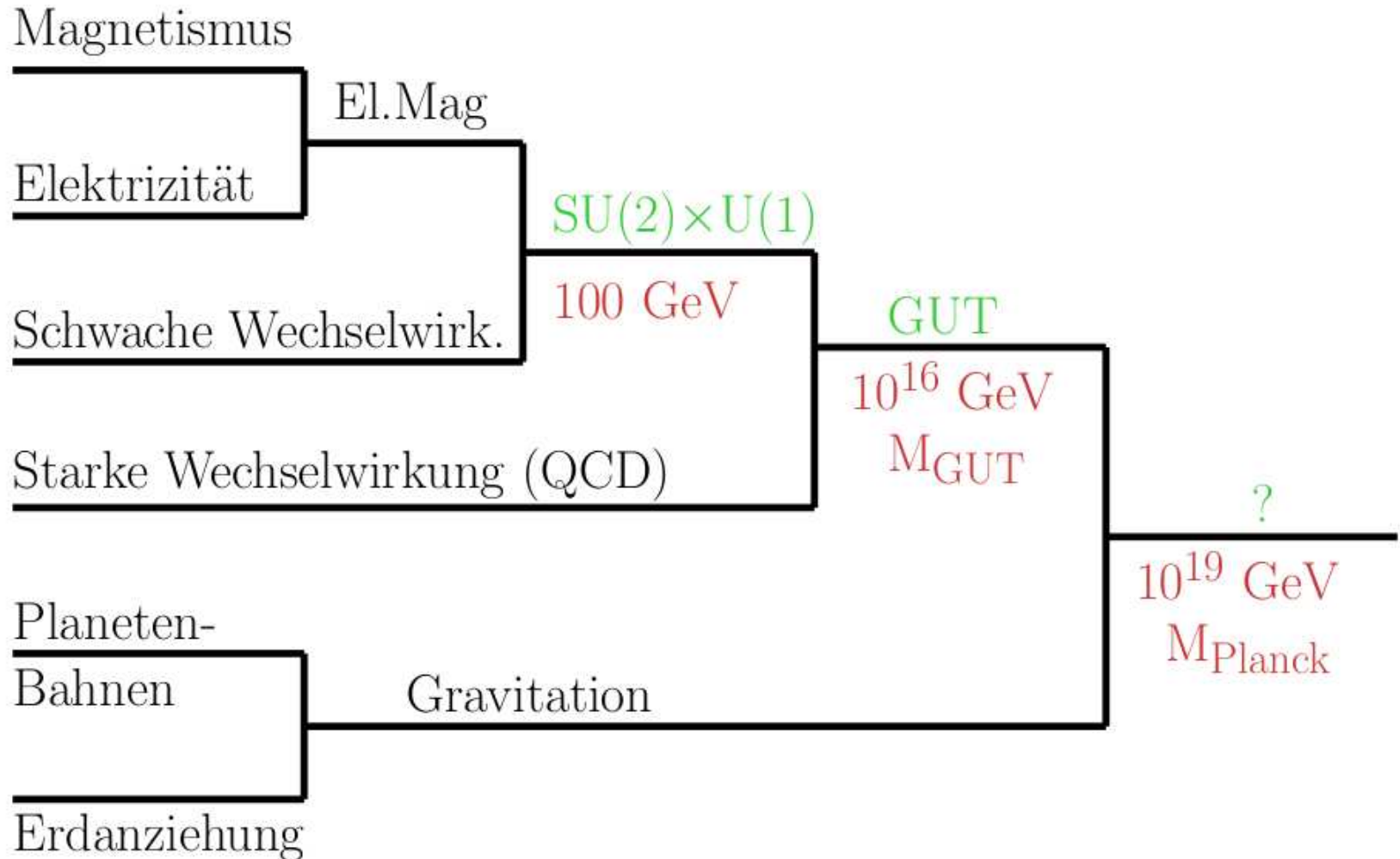
Die Suche nach der “Weltformel”

- Stringtheorie
- zusätzliche Raumdimensionen (Kaluza-Klein)
- 10-dimensionale Raumzeit und Bran-Welten
- holographisches Prinzip: AdS/CFT Dualität

Die Gravitation als “Chamäleon”

- Alle bekannten Kräfte könnten ihren Ursprung in höherdimensionaler Gravitation finden.
- oder die Gravitation ist nichts anderes als eine Eichtheorie am Rande des Volumens.

Vereinheitlichte Wechselwirkungen



Die Rolle der Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**
Stabilität der Atomkerne und damit aller Materie
- **Elektromagnetismus:**
Atom- und Molekülphysik, Biologie
- **Schwache Wechselwirkung:**
Sternentwicklung, Sonnenenergie
- **Gravitation:**
Entwicklung des Kosmos als Ganzem

Alle fundamentalen Wechselwirkungen sind von großer Bedeutung für unsere Existenz!

Calabi Yau Manifold

